

碱交代成矿作用的地球化学共性和归类

杜 乐 天

(北京铀矿地质研究所)

迄今为止,在国内和国外广大地区已发现了极其众多的下列元素的各种类型矿床,例如:

1. 产于钠长石化花岗岩、花岗伟晶岩体中的铌、钽、锂、铷、铯、铍、钨、锡等矿床(或称岩体浸染型、变花岗岩型、自变质型、云英岩型等等)和钾长石化花岗岩中的稀土矿床。

2. 产于碱性岩、内生碳酸岩(Carbonatites)中的铌、钽、锆、钍、铀、钽、磷、钽、稀土、铝等矿床。

3. 石英脉型钨、锡、铜、钼、金、银等矿床。

4. 斑岩型铜、钼、钨、锡、金等矿床。

5. 玢岩型铁、铜矿床。

6. 矽卡岩型铁、铜、钼、钨、铀等矿床。

7. 古老变质岩系(如元古界含铁石英岩、混合岩等)和混合岩化有关的钾交代或钠交代有关的铀、铁、铜等矿床。

8. 白云鄂博式的古老白云岩系中的铁、稀土、铌、钽等矿床。

9. 细碧角斑岩系中的黄铁矿型、含铜黄铁矿型铁、硫、铜等矿床。

10. 发育于任何岩系中的碱交代型热液铀、钽矿床。

11. 某些次生石英岩以及流纹质、安山质火山岩和次火山岩中的明矾石、硬石膏、萤石、重晶石、自然硫、叶蜡石等等非金属矿床。这些非金属矿床或者单独存在,但更多的是往往和有关金属矿床共生。这表明把非金属矿床和金属矿床截然分开各自成为独立的相互无联系的矿床分类是有问题的。在本文中我们即将看到它们在很多情况下是同一成矿作用成矿,但空间上可以分离。

12. 产于一些火山岩系中的金、银、铁、铜、铅、锌、钨、锡等超浅成热液矿床。

13. 产于裂谷热卤水中的有关金属和非金属矿床及日本的黑矿。

笔者对世界各地上述各类型矿床数百个实例的文献资料进行了反复对比和整理,发现:

1. 尽管这些矿床研究得已相当广泛和深入,但是除少数例外,大部分研究工作都是分别按单元素矿种或单类型矿床孤立地进行的。

2. 尽管上述各类矿床的地质特征和成矿条件相差如此悬殊,表面上似乎完全不相干,但实质上乃是同一类成矿作用在不同的岩石、不同的构造、不同的地质环境、不同的地质部位的不同外在表现方式和结果。如果透过现象看其本质和共性,深入到元素这一层次,把那极其复杂的地质条件简化为一些基本的少数的物理化学参数,从地球化学的观点重新考虑问题,则会得出以下重要结论:所有上述各种地质成矿作用可统称之为富碱热流体作用;

那些成矿元素包括稀有的和常量的亲氧族元素,稀有的和常量的亲硫族元素都是在这种富碱热流体作用中活化、迁移和富集的,因而可统称为亲碱元素。所谓流体是指岩浆、高温气相以及液相。在自然界中既有富碱的浆→气→液连续无界限的岩矿演化序列过渡(例如产铌钽钠长石花岗岩、产铁矿的玢岩之类)。但也有不连续的演化序列,即在流体中不存在浆相,只是气、液相,特别是液相和固相间的反应,这就是碱交代(热液)作用。

碱交代作用的概念很早就出现于文献中,国内外有很多人对它进行过深入研究并下过许多定义。不过应当指出,这些定义多属于地质学范畴。如从地球化学角度出发,碱交代作用乃是:在大量碱质(主要是钠、钾,有时还有可观的锂、铷、铯)及酸性挥发份的同时参与下,使岩石中发生碱增量并使岩石中阳离子集团的原子价结构产生歧化和空间再分配的一种热液作用。价歧化是指岩石在被碱交代后,一价碱金属大量带入,同时相当数量的高价(指高于二价者,下同)元素如硅、铝、钛、铁等带出,原来和氧离子集团(负二价)相平衡的阳离子集团的价结构遭到破坏,平均原子价降低小于2,为了进行价补偿,就要求高于二价的高价阳离子进入岩石以建立新的价平衡,这样形成的岩石中一价阳离子和三、四、五、六等高价阳离子向两极分化增量的现象可谓之价歧化。早年日本三宅太雄及我国郭承基等均计算过岩石的平均原子价,以此来解释在富碱岩石中许多稀有分散元素的富集和成矿^[1,2]。笔者受到他们很多启示。不过通过有关科研工作,还觉得尚有进一步发展的必要,对此似应作以下的增添:

1. 在碱交代作用中不仅要考虑微量的稀有金属的增量,更重要的是还应研究常量元素的增量及减量。稀有金属在碱交代作用中的量变密切受常量元素量变的制约。这些常量元素除钠、钾外还有铝、硅、钙、镁、铁、钛等。另外应强调,碱交代作用不只可以使稀有金属增量或成矿,而且还可以使常量元素成矿(如铝、铁、磷、钛、硫等)。

2. 应充分肯定非金属元素在碱交代作用中的重要意义,它们往往是酸性挥发份的重要成员,如C、P、B、S、F、Cl及有关化合物。物质系统内部的电中和法则决定了无论流体相还是固相中大量的碱质必然伴有大量的酸组份。碱交代一词严格说不够准确,只是突出了碱质的作用。在许多中外文献中经常可见在研究工作中往往只注意了碱而忽略了酸。但实际上碱交代是盐交代,碱、酸同等重要而且密切相关。自然界的六七十种各类蚀变交代实际上可归纳成碱蚀变和酸蚀变两大范畴,见表1。

众所周知在许多矿床中总是同时或先后发育多种碱、酸蚀变。在同一矿床中虽然成矿的元素是一种或少数几种,但富集的元素却多得多。例如含铜黄铁矿床中往往除铁、铜外还有硫、铅、锌、钼、氟等大量富集;碱性岩中除铌、钽、稀土等成矿外往往还有铝矿床或磷矿床;玢岩铁矿中还存在明矾石、硬石膏、磷灰石或硫矿体等等。大量实际资料表明碱蚀变和酸蚀变在同一矿床中空间上总是共生的,时间上总是有先后的,彼此间的关系很有规律。顺便提及,在中外地质文献中经常可见在共生矿物组合及蚀变的描述中,罗列名词、杂乱堆砌的现象似乎应该结束了。

3. 前人对碱交代的研究忽略了参加反应的物质系统的封闭性或开放性。这恰恰是一个决定矿化类型多样化的重要因素。在碱交代作用中所富集起来的成矿元素远不是都一定集中于碱交代岩之中。在自然界,矿体和碱交代体(以下简称碱体)存在相互分离以及分离远近的问题。因此我们在给碱交代作用下定义时强调了“空间再分配”的概念。

酸、碱蚀变地球化学分类表

表1

碱 蚀 变																											
白榴石化	正长石化	微斜长石化	冰长石化	天河石化	铁白云母化	黑云母化	白云母化	绢云母化	白云母化	金云母化	黑云母化	铁白云母化	锂辉石化	锂云母化	钠长石化	方柱石化	霞石石化	霓石化	霓辉石化	钠闪石化	蓝闪石化	绿帘角闪石化	烧绿石化	细晶石化	钙沸石化	方沸石化	铯榴石化
钾交代					钾交代					钠交代					钠交代					铯交代							
酸蚀变 (往往和碱蚀变伴随但可有位移和分离)																											
稀土氟磷酸盐化	金云母化	磷灰石化	萤石化	水铝氟石化	明矾石化	重晶石化	硬石膏化	黄钾铁矾化	方解石化	白云石化	菱铁白云石化	氟碳钙矿化	胶磷矿化	独居石化	磷灰石化	磷酸铁锰矿化	黄铜矿化	辉铜矿化	方铅矿化	闪锌矿化	其它硫化物化	电气石化	硅化	方钠石化	磷灰石化	方柱石化	溴碘交代
氟交代				硫酸交代				碳酸交代				磷酸交代				硫交代				硼酸交代		硅酸交代		氯交代		碘交代	

注：在碱交代作用中矿物要达到一定的数量（例如 $n\%$ ）才够称“化”。众所周知，往往同一种“化”可以反映两种或两种以上的“交代”。

为了反映碱交代作用物质系统的封闭程度，现提出以下五个地球化学特征值，即①液-固时差（a值）、②酸-碱距（b值）、③硅-碱距（b'值）、④矿-碱距（c值）、⑤钾-钠距（d值），然后根据这些特征值对文中前面所述的各种碱交代成矿作用加以重新归类。

1. 液-固时差(a值) 指碱交代热液活动的时间与被交代围岩形成的时间相隔的长短。众多的成矿成岩年龄测定结果表明，a值可以从零变动到十几亿年以上。a值的重要意义在于：

1) 如a值接近于零，则表明反应系统中的富碱气液活动和富碱岩浆冷却结晶为固相是大体同时进行或者二者时间间隔很小（一般为数百万年），这是富碱富挥发份岩浆体（如花岗岩、伟晶岩、碱性岩、内生碳酸盐岩）中的强烈自变质作用（有时称岩浆期后作用）以及在岩体顶盖向穹窿、凸起、鼓包处发生的液态熔离和交代作用的一大特征。众所周知，对产铯钽富钠花岗岩小岩体的成因多年来就存在岩浆说和交代说之争，但一直难见分晓。因为前已述及，这是一个浆→气→液的连续性的前后无明确界线的演化序列。值得指出，这种究竟是以岩浆结晶为主还是以热液交代为主的争论，也表现在多年来对伟晶岩、碱性岩、内生碳酸岩甚至对花岗岩等成因看法的尖锐分歧上。对于这样一些特殊情况笔者建议采用富碱热流体作用的概念为好。上述碱交代作用多是在相对比较封闭的条件下形成的。封闭式碱交代作用产生的碱交代岩有以下几大地质特点：①呈面式、体式分布，和断裂无关，在岩体的最高处而且在局部穹窿下封闭处发育最为强烈。②碱交代岩一般只见于岩体内部而不超出岩体范围。对于某些内生碳酸岩体，由于主成分是钙镁碳酸盐而缺硅、铝，大量的碱质将向外交代围岩形成

长霓岩化。③碱交代岩是在缺自由氧的条件下形成的，多是白色而不发红。可是如果 a 值很大，例如上亿年或更大，被交代岩石和交代热液在形成的物理化学条件上将完全两样。这时只有通过断裂构造来通导碱交代热液与岩石发生反应。这是开放系统下的碱交代作用，形成的碱交代岩多沿断裂成线状分布，而且绝大多数发生强烈红化。碱交代作用也将不仅限制在岩体本身而是沿深大断裂交代任何岩类。这是形成碱交代型热液铀矿最重要的一种成矿作用。这方面有大量的矿床实例，如我国北方和华南、苏联的乌克兰和中亚、瑞典北部、印度、巴西、非洲的索马里等地所见。 a 值如果不大不小，介于上二者之间，例如数十个百万年，则是斑岩、玢岩、矽卡岩、石英脉等矿化类型的碱交代作用的特征。此时碱交代体既可分布于岩体中又可扩展到岩体的外接触带。例如石英脉型钨锡矿床深部有钾长石化，而上部花岗岩及顶盖以上的沉积变质岩也发育强烈的钾交代（云英岩化），深部花岗岩体中的碱交代体的形态也介于面式和线式之间，大约多呈团块状、条带状等，总的是存在一种延长的方向性。因为液-固时差尚小，岩石冷却结晶不彻底，塑性尚强，不易产生脆性形变，故断裂构造不典型，碱交代岩的线形分布不突出。这是半封闭或半开放式碱交代作用的一大特点。碱交代岩有的是白色，有的是微弱红化，成肉红色。红化程度的深浅大体反映物质系统的封闭程度。

2) a 值的大小还能反映碱交代作用进行的物理化学环境及交代的彻底程度。 a 值越小，进行碱交代的气液其温度、压力、氧化还原条件等越接近原岩浆的高温、高压、还原性；气液的物质成分和原岩浆的差异性越小，碱交代岩在岩石成分、矿物成分及微量元素含量上越接近原岩浆岩。碱质气-液与碱质岩浆间的物理化学条件越相近，越易产生可逆反应，碱交代越不易彻底，岩浆结晶的现象越占突出地位而交代现象则越不明显，碱增量幅度就小。例如同是花岗岩，如遭受封闭式碱交代作用（ a 值接近于零），则钠交代岩的 Na_2O 一般比未受钠交代者只高出2—3%，从原来的3%增加到5—6%。但是在开放式碱交代（ a 值为数亿年），如为钠交代，则 Na_2O 可由原岩的3%增加到9—12%。总之， a 值大，碱交代的热液和围岩的地球化学势差大，易发生不可逆的单向反应，碱交代可以进行到底，碱增量可以达到最大值，而且经常是钾-钠二者有彻底的分离，要么是纯钠交代，要么是纯钾交代。 a 值大，岩石的交代现象就突出和明显。我们曾按 a 值的由小到大对比了产铌钽钠长石花岗岩、钨锡石英脉根部的钾钠长石化花岗岩、铀矿田花岗岩体剥蚀更深的碱交代体及沿区域深断裂分布的碱交代体（自然界至少有这四种碱交代岩），发现了上述种种规律。

3) a 值的大小还和下面一个重要现象相联系： a 值越接近于零，碱交代岩中所富集起来的成矿元素种类似乎越多。例如在许多钠长石花岗岩小岩体、钠长石伟晶岩体、碱性岩体中往往可以同时富集锂、铷、铯、铍、稀土、铌、钽、锆、钨、锡、铀、钍等，多达一二十种。但对于开放式碱交代成矿则只有极少数元素得到富集，主要是铀、钍，他们多形成铀（钍）的单矿种，顶多有时出现铀-磷型，铀-钼型，铀-钛型矿化。对于中等 a 值的半开放半封闭系统碱交代作用所富集起的成矿元素种数也大体居于二者之间，二、三种三、五种不等。

2. 酸-碱距(b 值) 前已述及，在碱交代热液中总同时既有碱又有酸共存。但只要有可能，酸和碱又总是要分离。这就看系统的封闭性。酸碱分离是整个碱交代作用和其成矿中的一个核心问题。众所周知，由于挥发性或饱和蒸气压上的巨大差别，碱质易于进入固相而固定，酸质则易于进入气液相而迁移，在开放性介质中就会形成酸碱分离，或称酸脱。笔者认

为本文中一开始列举的那十几种成矿类型之所以彼此在地质条件上存在很多很大的差异,其关键是因为酸碱有分离而且有不同的分离距。从成矿机制上看,只有酸脱才使得热液不致于因用掉大量碱质形成碱交代岩而其酸性急剧增强反过来阻止碱交代岩的大规模形成。矿质的大量释放正是来源于被碱交代岩石体内矿质的浸出,矿源提供的量与碱交代岩的发育规模和强度是紧密成正比的;只有酸脱也才使热液带走大量矿质,迁移到别的地质部位成矿;只有酸脱,才使得脱离碱交代体的热液继续保持酸性,到外围或上部遇到花岗岩、碳酸岩、矽卡岩、碱交代岩等这样的偏碱性围岩发生中和反应并且减压、降温而成矿。

酸碱分离的重要后果是矿-碱分离。众多的矿床实例表明除封闭式碱交代作用下的碱、酸、矿三位一体外,在大多数情况下矿质和酸质同步、同位。因为矿体和碱体往往空间上相分离,碱体多位于矿床深部,在勘探和开采中不一定能揭露到。所以长期来,像石英脉型钨、锡、金、银等矿床,斑岩型铜、钼、钨、锡、金、银等矿床,矽卡岩(或接触交代)等等矿床在不少情况下均不认为实质上是碱交代作用成矿。酸碱分离的地质前提是出现减压铁、铜区,压差对气液的驱动,例如各种类型的构造破碎带、断裂带、岩体接触带,火山孔道(火山颈、爆破砾岩筒或管、震碎带)以及裂谷等等。陆上和海底的火山喷气、热泉是否深部一定伴有强大的碱交代作用尚不得而知(细碧角斑岩系中发育强烈的碱交代作用则是肯定的)。但从物质成分上看这些火山喷气和热泉也是酸脱现象,例如红海裂谷热卤水沉积,日本的黑矿,世界很多地区的前寒武纪的含铁石英岩建造、含铁白云岩系、菱铁矿建造等等,这些好像彼此完全无关的地质产物在岩石、矿物、元素的成分组合上竟然是如此相似和相近,它们都可看作酸脱进入海水而后沉积的产物。所谓酸脱产物,可概括为以下五大类:

(1) 各类酸酐:首先是各种形式的 SiO_2 。它是见之于各种有关矿化类型的脉状、层状石英、玉髓、燧石、碧玉、蛋白石、次生石英岩等的主体。另外酸酐还包括Al、Ti、TR、Zr、Hf、U、Th、W、Sn、Nb、Ta以及S、B等的氧化物或含氧复盐。所有这些成分都有一个共同的重要地球化学特性,即在碱性溶液中最易溶解,它们极易形成络合物。

(2) 各种氟化物、氯化物。

(3) 各种硫化物、砷化物及硫盐。

(4) 碳酸、磷酸、硼酸、硫酸等以及与镁、钙、钡、锶、锰、铁等的盐类(包括各种矾类)。

(5) 氢交代粘土族矿物:高岭石、蒙脱石、水云母、地开石等等。

碱交代作用基本上是三阶段:前期酸脱—碱交代—后期酸脱(或简称酸尾)。前期酸脱以在开放式半开放式岩浆活动(火山及次火山作用)最为发育,而在较封闭的侵入岩浆作用中则不易发生。前期酸脱会导致碱交代的发生,这在火山活动基本结束之后易于出现。在酸性火山岩中普遍可见有碱交代热液蚀变即为证明。但必须强调,自然界碱交代作用的碱质来源是多途径的,华南花岗岩类演化晚期的钠转折,闪长岩—花岗岩演化序列晚期的钾转折,岩体外接触带的膏盐层(如扬子江中下游中下三叠系,北方的奥陶系马家沟灰岩等)的同化,来自硅镁壳或上地幔的富碱流体,裂谷式热卤水等等都可造成大规模碱交代。在封闭和半封闭碱交代作用中,前期酸脱现象不明显,而是更发育碱交代之后的后期酸脱。后期酸脱是最重要的成矿阶段。

酸碱分离的距离大体可分三种情况:

(1) b 值大体等于零, 即酸碱没有分离, 这是封闭式碱交代的特征。例如世界各地的产铌钽花岗岩小岩体不仅富钠, 而且同时还富硅, 成为超酸花岗岩。镜下看, 大量的石英和钠长石共生, 岩石中 SiO_2 可高达 75—76%。在岩体顶盖还可出现富石英的伟晶岩壳及石英壳。另外在此类岩体中和钠长石共生的还有大量其它酸组份矿物, 如黄玉、萤石等。众所周知石英在富碱流体中是最易溶解而迁移的酸组份之一, 但由于系统的封闭性, 无断裂等通道和外界沟通, 只能和富碱矿物共生在一起。在 b 值接近零的情况下酸体、矿体、碱体基本上是一位一体的。

(2) b 值为无限大, 或者更确切说酸碱发生了远距离的分离, 远远超出现在矿床的范围, 大于两公里左右。现在矿床内只看到碱体和矿体, 至于酸体何在不得而知。这是开放式碱交代作用的特征, 以碱交代(钠交代或钾交代)铀(钍)矿床最典型。

(3) b 值居中, 多变动在数百米间至一二公里。酸体和碱体是相互分离的但共存于矿床范围之内。在此情况下酸体往往处于碱体之外或之上, 有垂直分带或水平分带。这是一条非常重要的成矿和找矿规律。世界各地大量的石英脉型、斑岩型、玢岩型、矽卡岩型等半开放式碱交代矿床实例均表明了这一点。当然在这些矿床当中酸碱距也是变化的彼此不同的, 主要取决于构造的规模, 地层的渗透性等当地的具体地质条件。

总的说, 根据大量的矿床研究结果看, 在同一矿床内酸体比碱体有较浅的形成深度, 较低的温度和压力, 较低的 pH , 较小的规模, 较强的氧化性和较晚的形成时间。碱体是矿质活化、释放和提供的发源地。酸体所在是矿质沉淀固定的场地。沉淀的条件一定是反迁移的条件, 否则二者的环境和条件如果一样就不可能沉淀和成矿。我们称此为反势法则。根据上述矿质迁移和固定的反势法则, 可以引伸出一系列对找矿评价及盲矿预测很有用的地质依据。

由于 SiO_2 在地壳中的含量占压倒优势, 由于它在碱性热液中极易溶解迁移, 故酸体在很多情况下主要表现为硅质体(当然其中可以同时含有工业规模的各种氧化物、硫化物成矿物质), 故有时可称硅-碱距(b' 值)。必须强调, 由于后期酸体、硅体的叠加, 往往使得大体同期形成的酸碱距和硅碱距受到扰乱, 变得复杂或模糊。

3. 矿-碱距(c 值) c 值的意义和 b 值类似, 但又有重要区别。众多实例表明矿-碱距变化范围更宽。矿体既可出现于酸体中, 也可出现于碱体中, 或者一部分在碱体中, 主要部分在酸体中。一般说, 矿体的规模总小于酸体, 矿体只占酸体的一小部分, 而且可出现于酸体的不同部位。又由于“矿”实际上包括不同的成矿元素, 而且不同的元素在同一环境和条件下有不同的迁移能力和迁移距离, 它们的矿体有可能相互分离, 因此矿-碱距要比酸-碱距复杂得多。根据资料统计, 大体可确定以下由大到小相对的迁移距离: 稀碱金属 (Li 、 Rb 、 Cs) 及酸性挥发份 (F^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 BO_3^{3-} 、 SiO_3^{2-} 、 HS^- 、 S^{2-} 等) $\rightarrow \text{U} \rightarrow \text{Au}$ 、 Ag 、 $\text{Cu} \rightarrow \text{Fe}$ 、 $\text{Th} \rightarrow \text{W}$ 、 Sn 、 $\text{Be} \rightarrow \text{Mo}$ (Re) $\rightarrow \text{Nb}$ 、 Ta 、 Zr 、 $\text{Hf} \rightarrow \text{TR}$ 。当然这只是很粗略的一个经验顺序, 实际上存在着不完全符合这一顺序的实例。封闭式碱交代的 c 值为零; 开放式者为两公里以上; 半封闭式者多为数十米至数百米, 也有的可到 1—2 公里。

4. 钾-钠距(d 值) d 值在碱交代岩中的变化范围也很大。封闭式碱交代 d 值从零到数十米; 开放式者两公里以上; 半开放式者居中, 数十米到数百米。钾-钠距是指在碱交代岩中钾交代岩和钠交代岩分布的相互距离, 它是反映碱体内部结构的。钾-钠距是衡量碱交代作

用封闭程度的又一个很灵敏的尺度。我们曾统计了数以千计的世界各地(包括我们自己多年的专题研究)花岗岩、伟晶岩、碱性岩、混合岩的化学分析结果,可以发现K/Na比的变动很有规律。虽然上述各岩石有的 $K > Na$,有的 $Na > K$,但总的看二者大体在近于等量附近波动,K:Na从1:3到2:1。同一岩石中钾含量和钠含量之差(简称钾钠差)越小,越说明钾和钠并未发生显著的分选,相对说系统越是封闭的。但对于开放系统则景象就大不一样。我们的研究表明,在花岗岩的强钠交代岩中 Na_2O 可增量到12%,而同一岩石中的 K_2O 只剩下0.2%;相反的是在强钾交代岩中 K_2O 可增量到14.5%,而同一岩石中的 Na_2O 只剩下0.4%。如此看来K:Na可以从1:60变到36:1。钾钠二元素虽然同属碱金属族,但在固相矿物晶格中类质同象的容量很小,互相取代局限,而且密切和温度成反比(温度越低二者间的类质同象越不发育),导致了钾和钠在碱交代岩中的不相容性和发生分离。对于封闭式及半封闭式物质系统,如有碱交代岩形成往往是钾钠混合交代岩,二者在同一岩石中都是增量(视具体情况增量幅度可有差异)。但一到开放式系统钾钠二元素可以发生彻底的分离。在铀矿地质中有大量的实例,它们或者是纯钠交代或者是纯钾交代。

众所周知,对于不少元素的迁移富集存在着下述倾向性,在钠交代中更易形成铁、铀、钽、钍等矿化;钾交代中更易形成铜、钼、钨、锡、稀土、铍等矿化。至于铀、金、银等在二者中均可成矿。

根据前述五个碱交代作用地球化学特征值,现将自然界的各种碱交代作用归纳为三大基本类型,见表2。

碱交代作用归类表

表 2

碱 交 代 作 用	开 放 式	火山岩型	①海底火山喷气热泉沉积型(包括部分裂谷热卤水)及有关矿化 ②陆上火山岩型铀、钍及其他矿化
		深断裂带型	①和岩浆活动无明显联系的陆上深断裂型铀、钍、金、银等矿化 ②和岩浆活动无明显联系的裂谷热卤水型及有关矿化
	半 封 闭 (半 开 放) 式		①石英脉型钨、锡、金、银、钼、铍等矿化 ②斑岩型铜、钼、钨、锡、金、银等矿化 ③爆破砾岩型铜、钼、钨、锡、金、银等矿化 ④玢岩型铁、铜、硫铁矿,硬石膏,明矾石等矿化 ⑤矽卡岩型铁、铜、钼、钨、锡、金、银等矿化 ⑥细碧角斑岩型铁、铜、硫铁矿等矿化
	封 闭 式		①碱性岩体中后期碱交代及锂、铷、铯、铌、钽、钼、钨、锡、稀土、锆、铪、钛、铀、钍等矿化 ②碱性花岗岩体中后期碱交代及稀有、稀土等矿化 ③花岗岩体顶盖相凸部后期碱交代锂、铷、铯、铌、钽、钼、钨、锡、稀土等矿化 ④伟晶岩体中后期碱交代及锂、铷、铯、铌、钽、钼、钨、锡、铀、钍等矿化 ⑤内生碳酸岩体中后期碱交代及稀土铌、钽、铀、钍等矿化 ⑥混合岩化岩体及有关矿化

在本文的编写中曾从徐克勤、涂光炽、郭承基等先生的学术思想中得到启发,文稿又经王联魁、胡受奚二同志看过并提出了许多宝贵意见。在本文编写中笔者曾参阅了历年来各种

矿床会议内部资料。笔者曾去过许多矿种的矿山和地质队参观学习。对上述各有关单位和个人均表示深切感谢。

主要参考文献

- 〔1〕 郭承基 1965 稀有元素矿物化学 科学出版社
〔2〕 贵阳地球化学研究所 1979 华南花岗岩类的地球化学 科学出版社

GEOCHEMISTRY OF ALKALINE METASOMATISM

Du Letian

(Beijing Research Institute of Uranium Geology)

Abstract

Alkaline metasomatism (AM) is a type of hydrothermal process leading to increase in alkali metals and dipolarization of mean atomic valence of wall rocks. According to the confining nature of reaction substance systems, it may be divided into following three main classes:

1. Closed alkaline metasomatism: This class includes alkaline autometamorphism occurring within granitic intrusives, alkaline rocks, pegmatites, carbonatites, etc. It has four characteristic values which all approach to zero: the interval between the formation of the hydrothermal solutions and that of the wall rocks (value a); distance of silica from alkaline metasomatic rocks (AMR) (value b); distance of orebodies from AMR (value c); distance of sodium metasomatic rocks from potassium metasomatic rocks (value d). It seems to be the most important hydrothermal process forming ore deposits of Nb, Ta, Li, Be, Rb, Cs, TR, P, U, Th inside various magmatic bodies.

2. Open alkaline metasomatism: It is in linear distribution along regional faults and may appear in any rocks. Value a varies from several tens to hundreds of million years. Values b, c, d are so large (generally over 1 km) that they go beyond the extent of the deposit. This class is the most important ore-forming process of alkaline hydrothermal uranium deposits, which can be observed in north and south China, the Soviet Union, Canada, India, Brazil, South Africa, Sweden, etc. and is characterized by either pure sodium metasomatism or pure potassium one.

3. Semi-open alkaline metasomatism: In this class, alkaline metasomatic rocks are always connected with the surrounding environment by some fractures above them. The values of a, b, c, d are between those of the two above-des-

cribed classes. Although the eorebodies, siliceous bodies and AMR appear separately, they remain occurring within the same deposit. Most of the AMR are mixture of K-, Na-metasomatic rocks. This class is the main metasomatic process giving birth to a great variety of deposits in the world, such as quartz-vein-type W, Sn, Au, Ag, Cu, Mo deposits, porphyrite-type Fe deposits, skarn-type Fe, Cu deposits and porphyry-type Cu, Mo, W, Sn, Au deposits.

AM has five geochemical characteristics: 1) the incompatibility of K, Na in solid phase products, i. e. sodic minerals are preferentially replaced in the K-bearing hydrothermal solutions, whereas potassic minerals are preferentially replaced in the Na-bearing solutions, 2) desilicification, i. e. quartz in the rocks is dissolved and then moves in the alkaline hydrothermal solutions, 3) oxidation, i. e., Fe^{2+} is transformed into Fe^{3+} , 4) the participation of large amounts of acidic anion radicals, such as Cl^- , F^- , S^{2-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , in reaction and the introduction of some of them into solid phase products, 5) augmentation and concentration of high valence (>divalence) oxyphile elements, such as Al^{3+} , Fe^{3+} , V^{3+} , ΣTR , Ti^{4+} , Zr^{4+} , Hf^{4+} , Th^{4+} , U^{4+} , C^{4+} , Sn^{4+} , Nb^{5+} , Ta^{5+} , P^{5+} , W^{6+} , U^{6+} , etc.

The co-concentration of above mentioned elements might be ascribed to the following three laws: 1) law of atomic valence equilibrium of rocks; 2) law of co-migration of complex anions; 3) specialization of concentrated elements: Cu, Mo, Rb, ΣY etc. in K-metasomatism; Nb, Ta, Cs, Fe, etc. in Na-metasomatism; and U, Th, and Au in both cases.

The evolutionary line of AM is represented by the alternation of alkaline waves and acid waves. During the late stage of evolution, there frequently appears acid tail composed of quartz, chalcedony, alumstone, gypsum, barite, carbonates and ore-forming polymetallic sulfides; in the alkaline waves the alternation of K-waves and Na-waves also occur many times. As a result, sodic, potassic, siliceous and ore constituents form complex vertical and horizontal zonalities.